

РАДИООБНАРУЖЕНИЕ УСТОЙЧИВЫХ МЕТЕОРНЫХ СЛЕДОВ В РЕЖИМЕ ИНТЕГРИРОВАНИЯ

Е. И. ФИАЛКО

(Представлено научным семинаром радиотехнического факультета)

Введение

Низкочувствительная аппаратура обнаруживает метеорные следы лишь устойчивого типа, то есть следы с линейной плотностью электронов $\alpha \gg 10^{12}$ эл/см.

Обычно радиолокаторы, используемые для метеорных наблюдений, способны регистрировать неустойчивые следы (с $\alpha \ll 10^{12}$ эл/см); однако при резком увеличении уровня помех, при уменьшении мощности передатчика, а также при постановке специальных экспериментов, связанных с вариацией порогового сигнала в широких пределах и т. п., может оказаться, что локатор обнаруживает только устойчивые следы.

Зависимость числа зарегистрированных метеоров от параметров локатора в таком режиме уже рассматривалась ранее [1, 2 и др.], однако при этом не учитывалось наличие фоторегистрации. Вместе с тем большей частью наблюдения метеоров сопровождаются фоторегистрацией. Поэтому возникает необходимость исследования зависимости между числом обнаруженных метеорных следов и параметрами аппаратуры, атмосферы и метеоров с учетом интегрирующих свойств фотопленки.

В связи с тем, что устойчивые следы дают длительные отражения, можно вести анализ в предположении большого числа интегрирований как сигнала, так и шума, что существенно упрощает рассмотрение вопроса, так как позволяет считать, что эффективное значение шума с учетом интегрирования пропорционально корню квадратному из числа усреднений шума ($n_{ш}$), и что сигнал возрастает пропорционально числу усреднений сигнала (n_c) [2, 3];

$$\epsilon_{ш\text{ инт}} = \epsilon_{ш} \cdot n_{ш}, \quad (1)$$

$$\epsilon_{с\text{ инт}} = \epsilon_{с} \cdot n_c^2, \quad (2)$$

где $\epsilon_{ш}$ и $\epsilon_{с}$, $\epsilon_{ш\text{ инт}}$ и $\epsilon_{с\text{ инт}}$ — мощности сигнала и помех на выходе системы при отсутствии (и наличии) интегрирования.

Метеор будет обнаружен, если

$$\epsilon_{с\text{ инт}} \geq k \epsilon_{ш\text{ инт}}, \quad (3)$$

где k — коэффициент порядка единицы.

Как следует из (1)–(3), условие обнаружения метеора может быть представлено в виде

$$\varepsilon_c \gg \varepsilon_{ш} \cdot k \cdot \frac{n_{ш}}{n_c^2} \quad (4)$$

в случае, если $n_c < n_{ш}$, что имеет место, когда длительность отражения от метеорного следа $T_{сл}$ оказывается меньшей, чем время интегрирования шума $t_{ш}$; $t_{ш}$ — это время, в течение которого непрерывно движущаяся пленка смещается на расстояние, равное диаметру d_n изображения на пленке светового пятна, наблюдаемого на экране индикатора.

Если же $t_{ш} < T_{сл}$, то $n_c \equiv n_{ш}$, и неравенство (3) примет вид

$$\varepsilon_c \gg \varepsilon_{ш} \frac{k}{n_{ш}}. \quad (5)$$

Таким образом, если при отсутствии интегрирования мощность порогового сигнала равна

$$\varepsilon_n = k \varepsilon_{ш}, \quad (6)$$

то при наличии интегрирования

$$\varepsilon_{n \text{ инт}} = \varepsilon_n \frac{n_{ш}}{n_c^2} \quad (7)$$

(при $n_c > n_{ш}$), и

$$\varepsilon_{n \text{ инт}} = \frac{\varepsilon_n}{n_{ш}} \quad (8)$$

при $n_c \equiv n_{ш}$.

Случай, когда длительность отражения меньше длительности усреднения

Количество усреднений сигнала n_c и шума $n_{ш}$ будет соответственно равно

$$n_c = T_{сл} \cdot F_i \quad (9)$$

и

$$n_{ш} = t_{ш} F_i = \frac{d_n}{V_{пл}} F_i, \quad (10)$$

где F_i — частота посылки сигналов; $V_{пл}$ — скорость движения пленки; $T_{сл}$ — длительность отражения от устойчивого следа, равная [1]

$$T_{сл} = 1,12 \frac{10^{-12}}{16\pi^2} \cdot \frac{\lambda^2 \alpha}{D}; \quad (11)$$

λ — длина волны, D — коэффициент диффузии; α — линейная плотность электронов. Формула (11) справедлива при нормальном отражении радиоволн от ионизированного следа [1].

Мощность эхо-сигнала, создаваемого устойчивым следом, удаленным от локатора на расстояние R , как известно, равна [1]

$$\varepsilon_c = A \frac{P_i G^2 \lambda^3}{R^3} \alpha^{1/2}, \quad (12)$$

где P_i — излучаемая мощность в импульсе; G — коэффициент направленного действия антенны; $A = 1,62 \cdot 10^{-10}$. Подставляя в (4) выраже-

ния (12), (9), (10), (11) и (6), получим величину линейной плотности α обнаруживаемого следа

$$\alpha \gg B \left[\frac{\varepsilon_n D^2 R^3 d_n}{P_i G^2 \lambda^7 F_i V_{nl}} \right]^{0,4}, \quad (13)$$

где

$$B = \left[\left(\frac{16 \pi^2}{1,12} \right)^2 \cdot \frac{10^{24}}{A} \right]^{0,4} \approx 1,5 \cdot 10^{15}.$$

Рассматривая случай приема из слоя, расположенного на характеристической высоте [1], имеем

$$\alpha = \frac{4}{9} m \frac{\beta \cos \chi}{\mu H}, \quad (14)$$

где β —вероятность ионизации; m —масса метеорного тела; χ —зенитное расстояние радианта метеора; μ —масса атома метеорного тела; H —высота однородной атмосферы.

Минимальная масса метеорного тела, создающего регистрируемый след, как видно из (13) и (14), равна

$$m_{min} = \frac{9}{4} B \frac{\mu H}{\beta \cos \chi} \left(\frac{\varepsilon_n D^2 R^3 d_n}{P_i G^2 \lambda^7 F_i V_{nl}} \right)^{0,4}. \quad (15)$$

Количество отражений, приходящихся на единичную площадку, лежащую в плоскости эхо [1], фиксируемых за единицу времени, будет равно

$$N = \int_{m_{min}}^{\infty} p(m) dm; \quad (16)$$

здесь $p(m)$ —дифференциальный закон распределения метеорных тел по массам, представляемый обычно в виде

$$p(m) = \frac{b}{m^s}, \quad (17)$$

где b и s —коэффициенты, не зависящие от m . Подставляя в (16) выражения (17) и (15), получим

$$N = B_1 \cdot \frac{b}{s-1} \left\{ \frac{\beta \cos \chi}{\mu H} \left(\frac{P_i G^2 \lambda^7 F_i V_{nl}}{\varepsilon_n D^2 R^3 d_n} \right)^{0,4} \right\}^{s-1} \quad (18)$$

где

$$B_1 = \frac{4}{9} B^{1-s} = (2,6 \cdot 10^{-16} \text{ см})^{s-1}.$$

Эта зависимость, как указывалось выше, имеет силу при выполнении условия $t_{ш} \gg T_{сл}$, то есть при

$$\frac{\lambda^2 V_{nl}}{d_n} \leq 1,4 \cdot 10^{-14} \frac{D}{\alpha}. \quad (19)$$

Случай, когда длительность отражения больше длительности усреднения

Если $t_{ш} \leq T_{сл}$, то числа усреднений сигнала и шума одинаковы и, как следует из (5), (8), (10), (12), (14) и (16),

$$N = B_2 \cdot \frac{b}{s-1} \left\{ \frac{\beta \cos \chi}{\mu H} \left(-\frac{P_i G^2 \lambda^3 F_i d_n}{\epsilon_n R^3 V_{nl}} \right)^2 \right\}^{s-1}, \quad (20)$$

где

$$B_2 = \left(\frac{4}{9} A^2 \right)^{s-1} = (11,3 \cdot 10^{-21} \text{ см})^{s-1}.$$

Формула (20) справедлива при выполнении условия

$$\frac{\lambda^2 V_{nl}}{d_n} \geq 1,4 \cdot 10^{14} \frac{D}{\alpha}. \quad (21)$$

Следует отметить, что при малой скорости движения пленки кратковременные устойчивые отражения будут интегрироваться в режиме $t_{ш} > T_{сл}$, а длительные—в режиме $t_{ш} < T_{сл}$.

Анализ результатов

Как видно из (18) и (20), зависимость числа регистраций метеоров от параметров локатора (а также от параметров метеора и атмосферы) может быть различной при длительном ($t_{ш} > T_{сл}$) и кратковременном ($t_{ш} < T_{сл}$) усреднениях.

В режиме длительного усреднения N слабо зависит от частоты повторения

$$N \sim F_i^{0,4(s-1)}, \quad (22)$$

но резко зависит от длины волны

$$N \sim \lambda^{2,8(s-1)}. \quad (23)$$

В случае же кратковременного усреднения ($t_{ш} < T_{сл}$) численность гораздо резче (чем в случае $t_{ш} > T_{сл}$) зависит от частоты повторения

$$N \sim F_i^{2(s-1)} \quad (24)$$

и от длины волны

$$N \sim \lambda^{6(s-1)}. \quad (25)$$

Заметим, что зависимость $N(\lambda, \epsilon_n, P_i, G, R)$ в режиме $t_{ш} < T_{сл}$ имеет такой же характер как при отсутствии интегрирования, но при высокой оперативности системы [2].

Интересно отметить, что при $s \approx 2$, как следует из (23), численность зарегистрированных метеоров приблизительно пропорциональна кубу длины волны ($N \sim \lambda^3$); такой же результат практически имеет место и при обнаружении неустойчивых следов (без учета интегрирования) [4].

Обычно считают, что в режиме обнаружения устойчивых следов численность резко зависит от мощности излучения, и поэтому требование к стабильности мощности передатчика становится значительно жестче, чем при регистрации неустойчивых следов [5,6]. Этот вывод сделан на основании анализа зависимости $N(P_i) \sim P_i^2$, полученной без учета эффекта усреднения, имеющего место при фотоиндикации.

Как видно из (18),

$$N \sim P_i^{0,4(s-1)}, \quad (26)$$

что ближе к

$$N \sim P_i^{0,5(s-1)}, \quad (27)$$

справедливому при наблюдении неустойчивых следов (при отсутствии усреднения), чем к

$$N \sim P_i^{2(s-1)}, \quad (28)$$

имеющему место при обнаружении устойчивых следов (также без усреднения).

Но, как уже отмечалось, при выполнении условия (21) соотношения (22), (23) и (26) теряют силу, и зависимость N от λ , F_i , P_i и т. п. становится весьма резкой. Возникает естественный вопрос о том, какой режим ((19) или (21)) имеет место в реальных условиях, какой из этих режимов выгоднее и чем определяется переход из одного режима в другой.

Легко видеть, что одним из факторов, определяющих режим интегрирования, является скорость движения фотопленки.

Зависимость числа зарегистрированных метеоров от скорости протягивания фотопленки $V_{пл}$

Пока скорость пленки остается малой ($t_{ш} > T_{сл}$ и, следовательно, $V_{пл} < V_{пл}^* = \frac{d_n}{T_{сл}}$), как видно из (18)

$$N \sim V_{пл}^{0,4(s-1)}. \quad (29)$$

Как только скорость движения пленки становится большей, чем $V_{пл}^*$, дальнейшее увеличение $V_{пл}$ приводит к уменьшению числа регистраций (20):

$$N \sim V_{пл}^{-2(s-1)}. \quad (30)$$

Таким образом, наибольшее количество обнаруженных метеоров соответствует скорости $V_{пл}^* = \frac{d_n}{T_{сл}}$, и зависимость $N(V_{пл})$, как следует из (29) и (30), может быть представлена в виде

$$\frac{N(V)}{N_{\max}} = \left(\frac{V_{пл}}{V_{пл}^*} \right)^{0,4(s-1)} \quad \text{при } V_{пл} < V_{пл}^*; \quad (31)$$

$$\frac{N(V)}{N_{\max}} = \left(\frac{V_{пл}}{V_{пл}^*} \right)^{-2(s-1)} \quad \text{при } V_{пл} > V_{пл}^*, \quad (32)$$

где $V_{пл}^*$ (см. (19) или (21)) равна

$$V_{пл}^* = 1,4 \cdot 10^{14} \frac{d_n D}{\alpha \lambda^2}. \quad (33)$$

Если принять $d_n = 0,1$ мм, $D = 8$ м²/сек (что соответствует скорости метеора $V \approx 45$ км/сек [1,7]), $\alpha \approx 10^{13}$ эл/см, то

$$V_{пл}^* \approx \frac{100}{\lambda^2}$$

(здесь λ — в м, V^* — в мм/сек). При $\lambda = 10$ м $V_{пл}^* \approx 1$ мм/сек = 6 см/мин.

На рис. 1 представлена зависимость $\frac{N(V)}{N_{\max}}$, построенная по формулам (31) и (32) для $s = 2$.

Как видно из рис. 1, увеличение $V_{пл}$ в области $V_{пл} \gtrsim V_{пл}^*$ приводит к резкому уменьшению числа регистраций. Так, например, при $V_{пл} = 2 V_{пл}^*$ количество обнаруженных метеоров уменьшается в 4 ра-

за. В связи с этим, а также с целью экономного расхода пленки целесообразно использовать скорость пленки $V_{пл} \approx 0,5 V_{пл}^*$; при этом потеря в численности составит 20—30% от N_{max} .

При выборе $V_{пл} < V_{пл}^*$ зависимость численности от параметров аппаратуры, определяемая формулой (18), будет более слабой, чем при отсутствии усреднения.

Заметим, что в режиме усреднения зависимость числа регистраций от скорости пленки при обнаружении устойчивых следов оказывается более резкой, чем при обнаружении неустойчивых следов [8].

Выводы

Режим усреднения может существенно изменить зависимость числа обнаруженных метеоров от параметров радиолокатора.

Если время усреднения больше длительности отражений, то (при $s \approx 2$) число зарегистрированных устойчивых метеорных следов пропорционально (приблизенно) кубу длины волны и корню квадратному из частоты повторения импульсов.

Зависимость числа регистраций от скорости движения фотопленки имеет немонотонный характер.

Целесообразно выбирать скорость протяжки пленки вдвое меньшую, чем $V_{пл}^*$, соответствующую максимальной численности регистраций.

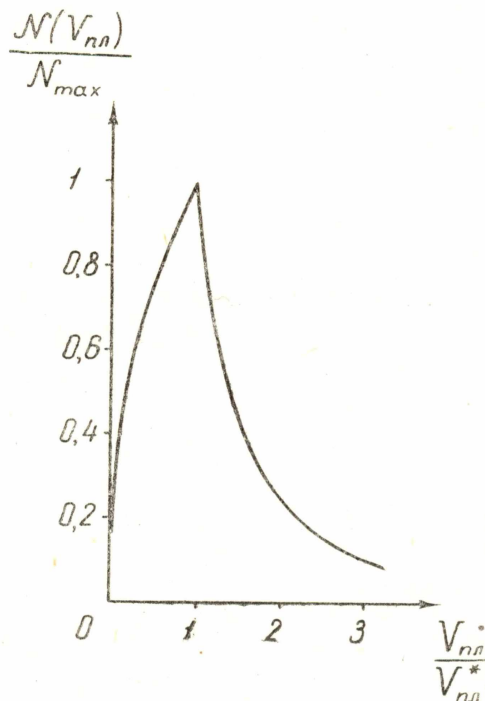


Рис. 1. Зависимость числа регистраций N от скорости движения пленки $V_{пл}$ при $s=2$. При $V < V_{пл}^*$

$$\frac{N(V_{пл})}{N_{max}} = \left(\frac{V_{пл}}{V_{пл}^*} \right)^{0,4};$$

$$\text{при } V > V_{пл}^* \quad \frac{N(V_{пл})}{N_{max}} = \left(\frac{V_{пл}^*}{V_{пл}} \right)^2.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. T. R. Kaiser. Radio-echo studies of meteor ionization, J. Adv. Phys., 2, No. 8, 495, 1953.
2. Е. И. Фиалко. Уверенное и случайное радиообнаружение устойчивых метеорных следов, Известия ТПИ, т. 100, 84, 1961.
3. Г. С. Зубарев. К вопросу о реальной чувствительности импульсного приемника в условиях яркостной отметки и фоторегистрации сигналов, Кандидатская диссертация, 1955.
4. Е. И. Фиалко. О зависимости часового числа обнаруженных метеоров от длины волны радиолокатора, Радиотехника, т. 15, N 12, 10, 1960.
5. Ф. И. Перегудов. Некоторые вопросы радиолокации метеоров; Кандидатская диссертация, Томский политехнический институт, 1959.
6. Е. И. Фиалко. О точности измерения параметров радиолокатора, предназначенного для метеорных наблюдений, Радиотехника, т. 15, N 6, 67, 1960.
7. J. S. Greenhow, E. L. Neufeld. The diffusion of ionized meteor trails in the upper atmosphere, Journ. Atm. Terr. Phys., 6, No. 2—3, 133, 1955.
8. Е. И. Фиалко. Радиообнаружение неустойчивых метеорных следов в режиме фоторегистрации, Известия ТПИ, т. 100, 106, 1962.